

# 半导体离子注入法\*

北京师范大学物理系离子束组

随着电子工业的飞速发展,对半导体器件提出了高频、大功率、高密度、低噪声、低功耗的要求,半导体工艺中的热扩散法,已很难胜任这些新的任务.因此人们都在寻找更有效的掺杂工艺.半导体离子注入法,就是六十年代发展起来的一种半导体掺杂的新方法.近来,人们把离子束和电子束结合起来称为“两束”技术,在很多国家已广泛地应用于半导体器件的研制和生产.它对于发展电子工业和宇宙探索技术具有十分重要的意义.

所谓半导体离子注入法<sup>1)</sup>,就是将要掺杂的元素进行电离,并在强电场下加速,使离子(如 $B^+$ 或 $P^+$ 等)获得一定能量,在真空中高速飞行,经过控制系统打入半导体,以改变其表面层的组份或性质.经过适当的热处理,可以得到p-n结或良好的欧姆接触.

早在1952年,即晶体管发明后四年,人们就研究用离子束的轰击来改善晶体管的特性.由于当时半导体工业水平所限,对于离子束和晶体的作用及它在晶体中造成的辐射损伤还不十分清楚,这一新技术没有得到人们应有的重视.而正是在这个时候,热扩散技术,却以崭新的姿态,在半导体制造工艺中获得了成功.再加上当时对半导体器件要求的水平,远不象今天这么高.热扩散法存在的问题和局限性,还没有充分暴露.所以,离子注入技术的发展受到了很大的妨碍.

随着原子能技术和宇宙探索技术的发展,对于离子束以及它对固体物质的轰击效果的研究,离子轰击对半导体材料的损伤及通过退火消除损伤等方面的研究进展和大容量离子束的产生,使离子注入技术的发展有了基础.也正是在这个时候,对于提高半导体器件性能的要求,越来越迫切.于是,在六十年代,离子注入技术又再度兴起.

近几年的实践证明,离子注入技术作为半导体新工艺,具有很大的生命力.它不仅和热扩散工艺可以互相补充、互相促进,而且它能够作出一般热扩散法难以作出的某些特殊器件.这就为半导体器件的制造工业,开辟了更为广阔的新领域.

## 一、离子注入法的优越性

第一个离子注入半导体器件问世以来,人们就不断和热扩散工艺制作的器件进行比较.鉴别其优劣,权衡其利弊.不断发现问题,并用现代技术分析研究,促使这一新技术不断发展.随着新型半导体器件的不断出现,离子注入技术在工业上的应用也更加普

\* 1972年8月25日收到.

1) 这里指最一般的注入方法,随着离子注入技术的不断发展,这一概念本身有了更广泛的含义,如台球模型法,离子溅射法等也统称为离子注入法.

遍。在比较、鉴别中,人们发现离子注入法与以往的半导体掺杂方法相比较有许多优点。概括起来说,就是:

1. 离子注入和热扩散工艺在半导体掺杂上具有本质不同的物理过程。它不受化学结合力和扩散系数的限制,原则上对于各种元素都可以掺杂。并且能够在低温、室温、高温三种情况下进行注入。所以不仅可以避免热扩散那种高温过程所带来的不良影响,而且在制造半导体器件工艺上,灵活多样,适应性强。可以对各种化合物半导体进行掺杂。在一定的注入条件下,还可以改变物质组份,制备新型的化合物固溶体材料,改变外延层中杂质分布等。

2. 离子注入法,可以使我们自由地支配两个独立参量(能量和剂量),从而能精确的控制掺杂的结深和浓度,并且通过对能量和注入剂量的独立控制,有可能得到研制器件需要的各种杂质浓度分布。这样就能制造某些有特殊要求的半导体器件。如浅结( $x_j < 0.2\mu$ ),高浓度或极低浓度(仅要求注入剂量为  $10^{10}/\text{cm}^2$ )的器件以及固体电路中扩散法难以制作的高电阻器等。

3. 离子注入法,几乎没有横向扩散的问题,而是沿靶面垂直方向注入。并且可用电扫描在大面积上均匀地注入。这些有利的条件就能提高器件的工作频率和集成度,能造出电气性能良好的大规模固体电路。而注入技术良好的重复性,可以使器件生产的成品率大大提高。

## 二、标志注入层质量的几个问题

用离子注入法,制作半导体器件,除了适当的热处理之外,也象热扩散一样,还必须知道注入杂质的分布规律、结深和表面浓度等参数,从而掌握注入层的质量和特性。下面将这几个问题,作一个简单介绍。

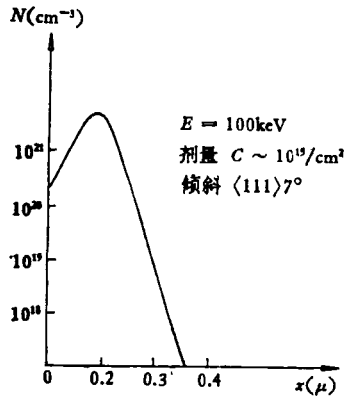
### 1. 热处理(退火)

由于入射离子和靶片中的原子核相互碰撞,使得晶体格点上的原子偏离了原来位置,造成微观损伤(辐射损伤),形成了表面层的非晶型,在一定温度下进行热处理(退火),由于晶体原子的振动和位移,使注入后的半导体片从结深处的单晶面上,向上外延生长而恢复晶体的完整性,从而消除辐射损伤。又因注入离子是靠动能强行射入半导体片的,它和热扩散那种热平衡过程完全不同,所以被注入的杂质往往处于间隙式状态。而在半导体中处于间隙式状态的杂质原子是不参加导电的,只有通过热处理,才能使注入的杂质原子处于晶体点阵位置,即替代式状态。可以说这时注入杂质被激活,才对导电有贡献。

退火条件因注入杂质的种类和器件工艺要求不同而各不相同。如对于  $B^+$  注入硅单晶片,一般在真空中( $\sim 10^{-5}$  托)  $900^\circ\text{C}$  恒温十分钟即可。这时注入的 B 杂质几乎全部被激活,表面的辐射损伤亦被消除。另外,对于不同的半导体材料退火条件也有相当大的差异。

### 2. 注入杂质在靶片中的纵向分布

具有一定动能的离子,射入靶片后,由于与靶片里的原子核和电子相互作用,逐渐损

图 1 P<sup>31</sup> 在硅中分布

失掉自己的能量，而终止在靶片里的某一位置。对于大量的入射离子来说，在确定的条件下，它们在靶片里的位置，遵循一定的统计分布，实验证明，象图 1 所示的条件，将 P<sup>31</sup> 离子轰击 P 型硅单晶片，入射方向沿 <111> 晶向偏离 7°，磷杂质在硅单晶中的纵向分布，近似于高斯函数分布。射入靶片的离子，通过若干能量损失机制的某种组合而停落在衬底中。对于低能量，尤其是低能量重离子的情况，能量损失主要是由于和衬底原子核的弹性碰撞；对于高能量轻离子，开始电子阻挡是主要的，能量首先传递给衬底的电子，直至本身速度减慢，原子核阻挡又占统治地位为止。

根据 LSS 原理，对于无定形靶材料，离子注入的杂质

纵剖面分布由下式确定：

$$N(x) = \frac{C e^{-\frac{(x-\bar{R})^2}{2\Delta R^2}}}{\Delta R \sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

式中：C——注入剂量 (cm<sup>-2</sup>)；

$\bar{R}$ ——离子注入靶材料中的平均有效射程；

$\Delta R$ ——平均偏离(即统计偏差)。

由(1)式看出，注入杂质在靶片中的纵向分布是和注入剂量及入射离子的种类、入射能量等(式中  $\bar{R}$  和  $\Delta R$  由离子种类、靶材料与入射能量等确定)有关。

在实验中，作为半导体掺杂的靶片，常常是一定取向的硅单晶片。对于理想的单晶体，入射离子沿晶体的某一晶向(如垂直<110>晶面)注入深度要比倾斜<111>晶向 7° 时大得多。离子沿自由晶向渗入晶体内部的这种从优注入现象，叫做离子注入的“沟道效应”。当“沟道效应”存在时，实际的分布  $N(x)$ ，将远远偏离 LSS 原理所预期的结果。但是，在半导体器件生产中，离子注入的真正靶片，晶格的规则性由位错、杂质原子(衬底掺杂)、表面氧化层等而打乱。“沟道效应”比理想的情况要小得多。如果我们在注入时，采取一些避免“沟道效应”的措施(如沿<111>晶向倾斜 7° 注入或注入前用质子先轰击一次)，就可以看到实际的分布  $N(x)$  非常接近 LSS 原理所预期的结果。

由(1)式可知，只要我们适当地分别控制注入剂量 C 和入射离子的能量，就可以人为地得到所需要的各种分布  $N(x)$ 。这正是离子注入技术的优越之处。

### 3. 离子注入的结深

众所周知，在半导体里，施主杂质和受主杂质是具有补偿作用的。换句话说，n 型杂质和 P 型杂质的作用可以互相抵消。因此，当单位体积中注入的杂质(如 P<sup>31</sup>) 数量超过衬底(如 P 型硅单晶)原有掺杂的杂质量(即背景浓度  $N_b$ ) 时，注入层开始反型。从而形成 p-n 结。我们把 P 型层与 n 型层的分界线到半导体表面的距离称为结深，常用字母  $x_j$  表示。由上述(1)式得结深公式如下：

$$x_j = \bar{R} \pm \sqrt{2 \Delta R} \sqrt{\ln \frac{C}{\sqrt{2\pi \Delta R} N(x_j)}}. \quad (2)$$

由结深的含义,可知

$$N(x_j) = N_b.$$

所以在(2)式中代入已知量  $\bar{R}$ 、 $\Delta R$  和  $C$ 、 $N_b$  便可求出对应的  $x_j$  值。

如用  $f(N_b)$  代表(2)式中第二项,则(2)式可以写成

$$x_j = \bar{R} \pm f(N_b). \quad (3)$$

可见,在一定的注入条件下,  $x_j$  有两个值,这说明在平均有效射程两侧,截面浓度下降到衬底的背景浓度处各形成一个结.使注入的半导体片出现了埋层现象.如图2所示.

在(3)式中,只有当

$$\bar{R} > f(N_b)$$

时,才有可能出现埋层.否则  $x_j = \bar{R} - f(N_b)$  为负值,没有实际意义.在生产中,一般  $N_b$  不很大(相对注入杂质表面浓度来说),选取的注入深度也较小,而实际的分布因种种原因较理论预期的要宽.所以多数情况下,只出现一个结.对于某一定半导体材料,结深和能量、注入剂量及注入杂质的种类有关.若注入条件一定,如 n-Si 材料中注入某一定剂量的  $B^+$  离子,则结深唯一的决定于注入离子的能量.因而对于离子注入掺杂工艺,结深能够精确的控制.

结深的测量一般采用磨角染色法,滚槽法和氧化剥层技术等.

#### 4. 表面浓度 $N_s$

和热扩散工艺一样,离子注入的半导体表面浓度  $N_s$ ,也是生产上关心的一个问题.根据注入条件,从式(1)中可以算出表面浓度,但是在有些情况下,理论计算结果和实验值出入较大.工艺上为了方便,对于某一定的注入条件常常测出表面薄层电阻和注入剂量的关系曲线,对于各种不同能量可以作出一组这样的曲线作为研制器件的参考.薄层电阻一般是在离子注入半导体片经过退火后,用四探针测量.因离子注入的杂质纵剖面分布近似于高斯分布,因而由测出的薄层电阻和结深近似按照高斯分布规律,能够换算出表面杂质浓度.为了准确起见,可以根据中子活化分析或质谱分析法测出的浓度值对四探针进行校准,直接求出杂质浓度和薄层电阻的关系.

实验证明,对于一定的人射离子和衬底,当表面浓度  $N_s$  小于固体饱和溶解度时,  $N_s$  和注入剂量  $C$ 、注入结深  $x_j$  有关.对于一定的  $x_j$ ,  $C$  越大,  $N_s$  越大;当  $C$  一定时,  $x_j$  越大,  $N_s$  越小,反之亦然.

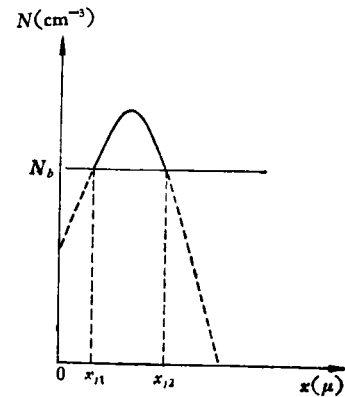


图2 离子注入埋层现象示意图

### 三、离子注入设备

早期的离子注入设备,是在核物理实验用加速器的基础上发展起来的,近几年来,随着离子注入技术的迅速发展,对离子注入设备本身提出了各种要求。离子注入机逐渐专业

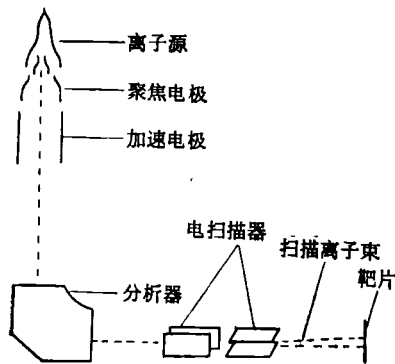


图3 离子注入原理示意图

化、系列化。按用途来分:有适合工业生产用的,操作方便、维护简单、小型专用的设备;有用于研究工作的参数变化范围宽、适应性强、灵活多用的实验室设备。按结构来分:有卧式,有立式的;有先加速后分析的,有先分析后加速的,还有分析器前后加(减)速相结合的等等。总之,目前的离子注入设备,按其用途不同,结构形状也各不相同。现仅就有代表性的设备介绍如下:一般离子注入机由离子源、加速装置、分析器和注入控制装置四部分组成,并配有真空系统和瞄准聚焦透镜等。其原理如图3所示。

#### 1. 离子源

离子源是产生注入所需离子的发生器。它是离子注入机的重要组成部分。把含有被注入杂质的化合物或元素引入离子源系统,以便产生所需要的离子。如将  $\text{PH}_3$  气体引入高频离子源,使  $\text{PH}_3$  分解,在高频电场作用下,被电场加速的自由电子撞击磷原子,使磷原子失去电子,而形成带正电荷的磷离子  $\text{P}^+$ 。

常用的离子源,有电子轰击源、离子轰击源和表面电离源等。电子轰击源是应用较多的一种。它的原理就是让自由电子在电场中获得足够的能量,以便把待电离的原子的外层电子轰击掉而形成带正电荷的离子,(一般失去一个电子如  $\text{P}^+$ ) 高频离子源就属于这一类。离子轰击源是弧光放电和溅射技术结合起来的一种离子源,这种源是先在辅助气体中进行弧光放电,形成等离子体。辅助气体的离子,在溅射电极上轰击出金属原子,然后再电离、引出。表面电离源是把低电离电位的原子蒸汽引向一个高脱出功的金属表面,假如金属表面是处在高温 ( $1000^\circ\text{C}$ — $2000^\circ\text{C}$ ) 下,则金属表面有可能俘获低电离电位原子的外层电子,从而使原子电离。

随着离子注入技术、热核研究技术、同位素分离技术的发展,成为它们组成部分的离子源装置也有了很大发展。近几年来,不断出现新型的离子源。根据结构特点的不同,也有各种类型。对于离子注入机的离子源,一般要求工作稳定,寿命长,聚焦性能好,引出束流大,能量分散度小,消耗功率少,可以电离的物质范围广,以及结构简单,运行方便等等。但是事物都是一分为二的,没有十全十美的离子源。只能根据需要,择其特点,选取某种合适的离子源。目前在离子注入机上应用较多的是高频离子源和双等离子体离子源。

#### 2. 加速装置

加速装置是对带电离子起加速作用的一种装置,从离子源引出的带有正电荷的离子,

在加速装置中利用高电压建立起的强电场,作用于离子,使离子获得所需要的能量,在高真空中(一般真空度  $\geq 10^{-5}$  托)以很大的速度飞行。由于大多数离子源产生的离子束中,是带有一个正电荷的离子如  $P^+$  或  $B^{+1)$ 。它在加速场中获得的能量  $E'$  (keV) 在数值上就等于加速电压  $E$  (kV)。

加速装置的主要组成部分是高压电源、加速管道和真空系统。因为加速电压一般比较高,所以采用较复杂的装置,如静电起电机、高压倍加线路等。

### 3. 分析器

半导体器件的制造,要求高纯度的掺杂。而离子源中引出的离子束是包含有多种带正电离子的混合束,必须采用分离器对离子束进行分离。分离器的分辨率应保证选出所需要的单一离子束。

目前离子注入采用的分离器,大多数是用扇形磁场或交叉电磁场分析的办法。用扇形磁场分析时,离子束通过均匀的磁场,在洛伦兹力的作用下,在垂直于磁场的平面上发生偏转,各种离子由于荷质比不同,偏转的曲率半径亦不同。那末在分析器入口、出口光栏一定的情况下,对于某一能量(加速电压一定,忽略离子源能量分散的影响)的离子束,我们可以通过确定磁场强度的办法,选出所需要的单一离子束。

在交叉电磁场分析器中,离子束通过正交均匀的电磁场区域时,同时受到方向相反的电场和磁场作用的两个力,对应一定的电磁场强度,具有某一荷质比的离子所受的这两个力在数值上相等,可以通过交叉电磁场而不发生偏转。对于其他荷质比的离子,因所受的两个力在数值上不相等,偏离原来运动方向,因而被除去。这样就可以用调节合适的电场与磁场来选取我们所需要的离子束。

### 4. 注入控制装置

对于束斑直径为毫米数量级的注入机,注入控制装置包括扫描器、注入剂量监测仪和靶室等。利用扫描器,可以使离子束在大面积靶片上均匀地掺杂。一般扫描装置类似于示波器的  $X$ 、 $Y$  偏转板,在离子行进中进行电扫描。不过扫描电压的波形、频率等参数根据需要各有不同。目前还有用机械扫描和电扫描配合的装置。

剂量监测仪,是专门记录注入靶片离子数量的电控制系统。从它的自动记数中,可以人为地准确控制掺杂剂量。

半导体基片的离子注入,可以在室温、高温、低温下进行。各种情况不同,靶室结构也有所不同。为了提高效率和调节靶片取向,靶室有采用联动机构,进行两个自由度旋转的转靶,有步进式的装片盘等各种形式。

## 四、离子注入技术目前的概况及今后发展

自从1961年第一个实用的离子注入器件——离子注入硅粒子探测器问世以来,离子

1) 近来人们在研究利用多电荷离子源,此处仅指带有一个电荷的离子。

注入技术应用于制造半导体器件很快引起了人们的注意。目前这种新型的掺杂技术,无论在掺杂的基本工艺实验方面,还是在应用于器件的制造方面,都进行了大量的工作,取得了显著的成效。

为了满足器件制造的要求,在基本工艺实验方面,对能量和结深的关系;退火对于掺杂效率和消除辐射损伤的影响;不同掩蔽膜对于注入离子的阻挡作用;离子注入在靶片中的纵剖面分布及沟道效应与注入离子能量、剂量、靶片晶向的关系等等,都作了系统的实验工作。已经能按照器件的要求,准确的控制掺杂的深度和掺杂的浓度,并能得到良好的p-n结特性。

用离子注入工艺制造器件,在近几年来取得了很大的进展。比热扩散法显示出了巨大的优越性。如 $B^+$ 注入到硅中作出了4GC低噪声微波晶体管。其工作频率为4GC时,噪声系数为4分贝;离子注入2048位MOS集成电路和双漂移区碰撞雪崩渡越时间二极管(IMPATT),已达到较高水平。目前正在研制利用离子注入工艺制造硅的高频大功率晶体管。“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”离子注入技术虽然在若干高水平的器件上获得了成功,但它毕竟还是一种正在发展中的掺杂工艺。随着工业生产和科学技术的发展,今后还有大量的工作要做。

首先,要有能满足工业生产要求的离子注入机,其性能要稳定、可靠、寿命长、操作方便和易于维护,象目前实验室用的注入机,用到工业生产上还有困难。因而这就需要按照器件生产的要求,来设计制造专用的简便的注入机。

在注入技术上,近来也有很大的发展。束斑为毫米数量级的设备,为了选择注入,必须有适当的掩模。现在开始用离子束成象的办法,使离子束按照电路设计的图案呈图象状直接注入到半导体片上,以减少工艺过程,提高注入效率。

发展束斑为微米数量级的离子注入设备,一直是人们非常注意的一个问题。利用这种设备可以在计算机的程序控制下,直接在半导体片上“描绘”出所需要的图形来。但是提高流强、缩短注入时间,却是这种设备难以克服的困难。因此,人们在实践中,正在改进、提高这种设备的性能。有的采用多束相对移动集体加工的方法。这种方法是把分析后的离子束再分解为许多平行的细束,而每一个细束都是微米级斑径。这样在作集成电路时,每一个束可以“画”一个图形。全部细束集体加工,大大提高了生产效率。并且利用这种设备可以蚀刻氧化层和金属化层,代替目前的光刻。

在注入方法上,除了通常的电离杂质进行掺杂之外,现在还有气体离子轰击法,即“台球模型”法。用比较容易得到的气体离子(如氩离子),把蒸发在半导体表面的金属(如铝)打进半导体内,以达到掺杂目的。还有离子溅射法,即用高速离子轰击某种需要掺杂的元素,向靶片溅射该杂质原子,同样可以达到掺杂目的。

由于化合物器件比起硅器件有许多特点,所以化合物的离子注入日益受到人们的注意,近几年来有了一定的进展。用热扩散法制作化合物结型器件比之于硅器件来说,遇到了更大的困难。如高温扩散时化合物分解,掺杂杂质与化合物组分的化学反应,扩散杂质的析出等等。因而离子注入对于化合物半导体具有更大的优越性。化合物的离子注入在基本工艺实验方面和用于器件的制造上都与硅有很大的不同。前者比后者要复杂得多。

目前在这两方面已开展了广泛的研究工作,特别是在 GaAs 器件上已初见成效。

离子注入工艺不仅能作为器件制造上一种新的掺杂工艺,而且还可用于研制新型的化合物固溶体材料。如在 GaAs 材料中注入  $Al^+$  和  $P^+$ , 便可得到  $Ga_{1-x}Al_xAs$  和  $GaAs_{1-x}P_x$ , 并且可精确地控制组分配比。因而能控制其禁带宽度,从而控制其发光波长。应用离子注入研制新的化合物半导体材料是离子注入发展的一个重要方向。

以上简单介绍了离子注入技术的优越性和在工业上的应用以及当前的发展动向。它和任何的先进技术一样,有它优越的一面,也有其不足之处。如现在的注入机,设备复杂,价格昂贵,需要有一定的射线防护等等。不过离子注入技术作为一种新的掺杂工艺和热扩散法相互补充,必能在半导体器件的生产上发挥更大的作用。

本文曾经过有色金属研究院余怀之同志等审阅和补充,在此表示感谢。

---

“关于开式谐振腔振荡模的角分布”一文的勘误

文献[1]中所讨论的共焦谐振腔的角分布对 2,3 次模的积分结果计算有错误。我们知道二维共焦腔积分方程的准几何近似解是厄米-高斯函数<sup>[2]</sup>,即

$$U_m(\xi) = C_m H_m(\xi) \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right).$$

而厄米-高斯函数是傅里叶变换不变形的,因此它的角分布等于

$$J_m(\omega) = C'_m H_m(\omega) \exp\left(-\frac{1}{2}\omega^2\right)$$

仍为厄米-高斯函数。具体分布曲线参阅[3]。

因此结论是:共焦腔角分布的半宽度随模序数的增加而变大,与平面腔相似。不同的是它的主瓣高度与附瓣高度的比没有平面腔那么大。

方洪烈

参 考 文 献

- [1] 方洪烈, 物理, 1 (1972), 106.  
 [2] G. D. Boyd, J. P. Gordon, B. S. T. J., 40 (1961), 489.  
 [3] 周世勋, 量子力学, 上海科学技术出版社 (1961), 57.
-